

AVALIAÇÃO DO FRESAMENTO DE AÇO ENDURECIDO CONSIDERANDO-SE ASPECTOS ECONÔMICOS, SOCIAIS E AMBIENTAIS

Gerônimo Freitas do Amaral¹, gamaral91@hotmail.com
João Carlos Espíndola Ferreira¹, j.c.ferreira@ufsc.br

¹Universidade Federal de Santa Catarina, Dep. Engenharia Mecânica, Florianópolis, SC, 88040-900, Brasil

Resumo: No cenário atual da manufatura há diversas preocupações das organizações industriais em manter a competitividade e excelência em seus produtos e serviços. Atualmente, com o grande consumo de produtos manufaturados os engenheiros necessitam desenvolver com frequência cada vez maior novos portfólios de produtos para oferecer aos consumidores. Paralelamente, aspectos relacionados à preservação ambiental têm sido cada vez mais valorizados pelos consumidores, e empresas que incluem em seus processos elementos relacionados à sustentabilidade podem ter um diferencial competitivo no mercado. Na confecção de produtos, muitas vezes utilizam-se matrizes para dar forma aos materiais, as quais são fabricadas por processo de usinagem e, posteriormente, submetidas a tratamentos térmicos para melhorar o desempenho. Nesse contexto, esta pesquisa busca contribuir para a fabricação de matrizes usinadas no estado endurecido, com o intuito de alcançar uma boa superfície usinada. Além disto, faz-se uma análise no que tange o tripé da sustentabilidade, abordando as dimensões ambiental, econômica e social. Neste trabalho são fresadas cavidades em peças de aço ferramenta AISI D6 tratadas termicamente (60 HRC de dureza), utilizando ferramentas de metal duro com revestimento. Foram estabelecidas três diferentes trajetórias de usinagem: ziguezague, paralelo ao perfil e trocoidal, com diferentes valores de velocidade de corte, verificando o desgaste da ferramenta de corte e a qualidade da superfície usinada. Além disso, monitorou-se a energia ativa exigida pela máquina, a emissão sonora e a luminosidade do ambiente. Como resultados deste trabalho, a qualidade da superfície usinada obtida foi adequada no que se refere aos parâmetros de rugosidade R_a e R_z , sendo que o melhor resultado de rugosidade correspondeu à trajetória trocoidal, que também resultou no menor desgaste no gume, porém com tempo de usinagem três vezes maior que usando-se as outras duas trajetórias utilizadas nos ensaios. Quanto à avaliação da sustentabilidade, aplicou-se nos ensaios uma abordagem que permite obter valores de parâmetros de usinagem que resultam em melhorias nas dimensões ambiental e social, sem perdas no âmbito econômico.

Palavras-chave: Fresamento, Aços Endurecidos, Tripé da Sustentabilidade, Trajetórias de Ferramentas, Manufatura Sustentável.

1. INTRODUÇÃO

A situação atual do mercado globalizado tem causado grandes mudanças no ambiente de produção, uma vez que no passado o mercado era voltado principalmente para empresas locais. Atualmente, empresas de porte mundial têm atuado em qualquer lugar do planeta. Em consequência, o consumidor tem acesso a mais escolhas, motivando a compra de um produto com qualidade, confiabilidade e baixo custo (Ferreira e Wysk, 2001).

Com o passar do tempo, as exigências dos clientes em conjunto com a concorrência entre os fabricantes de bens de consumo, levou a indústria de manufatura a expandir opções em relação ao fornecimento de soluções na produção de novos produtos, uma vez que o ciclo de vida até o descarte dos produtos tem menor duração. Outra necessidade é que as empresas de manufatura forneçam produtos com a qualidade desejada pelos clientes, o que exige a busca por processos enxutos e padronizados evitando desperdícios na produção (Menezes, 2014).

Os processos de usinagem têm uma grande importância na agregação de valor aos produtos, e em alguns produtos quase que a totalidade da fabricação corresponde a um ou mais processos de usinagem. O processo de usinagem busca atingir resultados quanto ao acabamento das superfícies usinadas, dimensões mais precisas, de acordo com as especificações de fabricação e com o seu uso (Vivancos et al., 2004).

Dentre os processos de usinagem tem-se o fresamento, mediante o qual obtém-se formas simples e complexas para geometrias tipicamente prismáticas. Grande parte dos moldes para produtos de materiais plásticos, bem como ferramentas para conformação são obtidas mediante o fresamento de aços de alta dureza (Suchy, 2006).

É importante desenvolver pesquisa sobre processos de usinagem de materiais endurecidos, visto que tais processos podem diminuir as etapas para a obtenção do produto.

Outra questão importante atualmente é a sustentabilidade na indústria, que leva em consideração o meio ambiente nos meios de fabricação, buscando-se: (a) reduzir a quantidade de energia necessária para a transformação da matéria-prima; (b) minimizar o consumo de energia pelos processos; (c) efetuar o descarte correto dos meios lubrificantes. Para isso, é importante um melhor entendimento dos fenômenos que ocorrem durante processos como a usinagem.

Mudanças nos processos industriais tem reflexo na sustentabilidade nos âmbitos ambiental, econômico e social. Nas avaliações da sustentabilidade é importante retratar os impactos reais das ocorrências observadas e discuti-las apropriadamente, correlacionando os âmbitos para corretas inferências e identificação de potenciais áreas de melhorias. Nesse contexto, este trabalho tem por objetivo desenvolver uma metodologia de avaliação de sustentabilidade no âmbito do tripé da sustentabilidade (aspectos ambiental, econômico e social) (Savitz e Weber, 2006), e aplicá-la ao processo de usinagem por fresamento de aços ferramenta.

Para isso, foi realizado o fresamento de cavidades em aço AISI D6 com diferentes velocidades e trajetórias de corte, e a qualidade da superfície foi avaliada por meio dos parâmetros de rugosidade R_a , R_t e R_{sk} (fator de assimetria). Além disso, foram estudados os desgastes das ferramentas de usinagem, e foram obtidos valores de parâmetros importantes para a avaliação da sustentabilidade do processo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos foram feitos na Universidade Federal de Santa Maria (RS), no Laboratório de Usinagem por Comando Numérico do Colégio Técnico de Santa Maria. Nas seções a seguir são descritos os equipamentos e a metodologia experimental empregados na pesquisa.

2.1. Equipamentos para a Usinagem

A máquina-ferramenta utilizada na realização dos ensaios de usinagem foi o centro de usinagem Romi D600, com CNC GE-FANUC Oi-MC. Este centro de usinagem possui três eixos, com potência de 15kW no motor principal.

A medição das superfícies usinadas foi feita utilizando-se o rugosímetro digital marca Instrutherm, modelo RP 200. Foi utilizado o filtro de Gauss nas medições e *cut-off* de 0,8 mm com comprimento de amostragem de 5 mm, e selecionada a faixa de medição de $\pm 40 \mu\text{m}$.

A intensidade da luminosidade foi medida com o luxímetro SKLD-400 da fabricante Skill-Tec, o qual tem duas funções de medição: em lux e *footcandle*. Para a obtenção dos resultados de luminosidade do ambiente também foi feita a conexão com computador para arquivar os resultados obtidos ao longo dos testes. O software utilizado foi Light Meter, disponibilizado juntamente com a aquisição do equipamento.

O decibelímetro utilizado para captação da emissão sonora do ambiente durante os testes de usinagem foi o ITDEC-4080, da Instrutemp. Ele foi conectado ao computador por meio de entrada USB, e captados os resultados com o software SLMM, o qual adquire e armazena os dados de emissão sonora a cada segundo.

O microscópio STEMI SV8, da fabricante Zeiss, foi utilizado para a aquisição das imagens dos desgastes das ferramentas de corte, e junto ao microscópio foi utilizado o sistema de captura de imagens da Leica EC3.

Para determinar a energia ativa consumida pela máquina-ferramenta, foi utilizado o transdutor de energia com sensor de corrente não invasivo Mult-K 120, da fabricante KRON. Esse equipamento possibilita a medição de até 44 parâmetros elétricos em sistemas monofásicos, bifásicos ou trifásicos (estrela/delta) de forma local (versão com display LCD) e/ou remota através da saída RS-485.

O transdutor foi posicionado na entrada de energia da máquina-ferramenta, podendo-se assim medir toda a energia utilizada para o funcionamento da máquina. Optou-se por medir o consumo total do centro de usinagem para ter-se o consumo efetivo e o impacto gerado pela usinagem, não somente medindo-se a energia necessária para as movimentações dos eixos e fuso. Em máquinas CNC há um grande aparato tecnológico que consome de energia (por exemplo, sistema auxiliar de lubrificação), e seus elementos devem ser considerados para avaliar os impactos.

2.2. Ferramentas de Corte

O experimento foi realizado com insertos de metal-duro classe VP15TF (ISO H10-H20), revestidos com (Al,Ti)N, os quais foram especificamente desenvolvidos para o corte de aços endurecidos. Com a finalidade de eliminar a camada mais externa do material após o tratamento térmico foi efetuado o desbaste com cabeçote de fresamento 90°, e então o acabamento foi feito com uma ferramenta também com corte de 90°, com diâmetro de 16 mm.

A escolha dos insertos de metal-duro foi feita após avaliar as possibilidades disponíveis no mercado, bem como seguindo algumas publicações (por exemplo, Grzesik, 2008; Smith, 2008). Dois fatores foram considerados quanto à utilização do metal-duro: (a) o fator econômico se comparado com inserto de cBN (nitreto de boro cúbico), o qual é bem mais caro do que o metal-duro, (b) pela aplicação no fresamento, que tem característica de corte interrompido, uma vez que o metal-duro tem maior tenacidade em comparação com o cBN.

A avaliação das opções de ferramentas também se deu por meio da análise dos catálogos da Sandvik (2013), Mitsubishi (2015) e Kennametal (2015), em que buscou-se verificar a disponibilidade de materiais de ferramentas e geometrias para a usinagem do aço AISI D6, que é o material considerado neste trabalho.

2.3. Material e Corpo de Prova para Ensaio

Na realização dos experimentos foi usinado o aço AISI D6, com dureza entre 60-62 HRC. O material bruto foi tratado termicamente por processos de têmpera e revenido. Este aço é utilizado no ramo da matrizaria para corte de

chapas, bem como cortes de precisão na produção de papel. Outras aplicações são em guias de máquinas, régua e ferramentas em geral, onde exige-se máxima resistência à abrasão e estabilidade do gume de corte (Villares, 2009).

A geometria dos corpos de prova usinados neste trabalho é: 50 mm de comprimento, 50 mm de largura e 10 mm de profundidade. Eles foram obtidos a partir de barras chatas, com as cavidades usinadas em uma das faces. A profundidade de cada cavidade foi definida em 0,2 mm na operação de acabamento.

2.4. Trajetórias e Parâmetros de corte

Foram utilizadas três diferentes trajetórias de corte, as quais geraram uma cavidade com fundo plano, as quais são: (a) ziguezague; (b) paralela ao contorno; (c) trocoidal, como mostrado na Fig. (1).

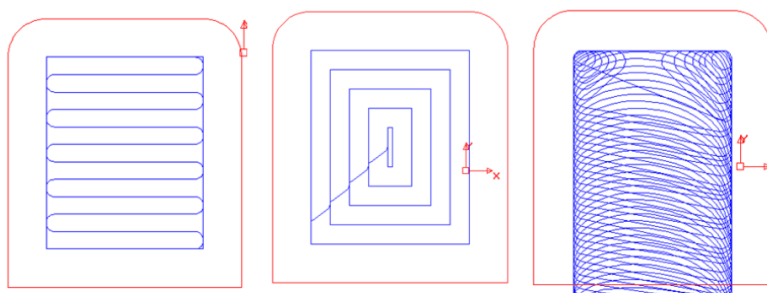


Figura 1. Trajetórias usadas: ziguezague (esquerda), paralela ao contorno (centro) e trocoidal (direita).

Com relação aos parâmetros de corte, duas velocidades de corte (V_c) foram empregadas na usinagem, e os valores utilizados foram obtidos com base na recomendação do fabricante. Os demais parâmetros de corte (a_p , a_e e V_f) foram fixados e igualmente repetidos em todos os experimentos. Escolheu-se as seguintes velocidades de corte: (a) 60m/min (V_{c1}), a qual situa-se dentro da faixa recomendada pelo fabricante (Mitsubishi, 2015) (entre 50 e 80 m/min); (b) 85m/min (V_{c2}), superior ao limite sugerido pelo fabricante.

2.5. Procedimento Experimental

O delineamento experimental segue os princípios descritos por Montgomery (2012) onde, para um experimento, são estabelecidas etapas para obter e tratar os dados. A combinação dos fatores foi feita variando-se a velocidade de corte (V_c) e as diferentes trajetórias descritas anteriormente. Tem-se assim seis combinações diferentes aplicáveis a cada corpo de prova, e são efetuadas quatro replicações de cada combinação, totalizando 24 cavidades usinadas. As combinações foram definidas como mostrado na Tab. (1).

Tabela 1. Combinação de fatores para a usinagem dos corpos de prova.

Combinação	Velocidade de Corte	Trajecória
ZZ60	60 m/min	Ziguezague
PP60	60 m/min	Paralela ao perfil
PP85	85 m/min	Paralela ao perfil
ZZ85	85 m/min	Ziguezague
TR85	85 m/min	Trocoidal
TR60	60 m/min	Trocoidal

A usinagem foi feita em desbaste e acabamento. Os 0,7 mm de profundidade de corte (a_p) a ser usinada foi subdividida em 0,5 mm no desbaste e 0,2 mm para acabamento, onde foram aplicadas as combinações descritas acima.

A avaliação da qualidade da superfície foi feita por meio dos parâmetros R_a , R_t e R_{sk} . Foram feitas quatro medições paralelas ao eixo x, mais quatro medições paralelas ao eixo y, e também três medidas de rugosidade a 45° do eixo x, totalizando 11 medidas por cavidade. Após obterem-se os resultados, calculou-se o desvio padrão das rugosidades para cada combinação, e determinou-se a variância das medições. Buscou-se realizar correlações dos parâmetros de entrada com as rugosidades obtidas, além de relacionar o resultado com a taxa de remoção e o desgaste da ferramenta.

Para cada combinação foi utilizada a mesma ferramenta de corte, a qual realiza o acabamento de quatro cavidades. Para a totalidade do experimento foram utilizados seis pares de inserts na operação de acabamento.

A modelagem dos corpos de prova foi feita no software SolidWorks, e o software SolidCAM foi utilizado para a geração das estratégias de usinagem e geração dos programas para comando numérico. Foram gerados seis diferentes programas NC (código G) correspondentes às seis combinações de parâmetros.

A operação de desbaste foi feita da mesma maneira para todas as cavidades, sendo assim um parâmetro fixo. Já a operação de acabamento foi programada de acordo com as trajetórias selecionadas (ziguezague, paralela ao contorno e

trocoidal), mantendo fixos os parâmetros a_p e a_e , mas alterando-se o avanço por dente (f_z) e a velocidade de corte. O método de entrada da ferramenta na estratégia zigzague é pela face paralela ao eixo y , enquanto nas demais trajetórias o ponto de entrada da ferramenta é em rampa no centro da peça, respeitando-se os parâmetros de inclinação mínima da ferramenta de corte. As ferramentas de corte foram montadas em cones BT-40 com sistema de pinças.

O método proposto para a avaliação da sustentabilidade nas dimensões do tripé da sustentabilidade possui quatro etapas. Na primeira etapa é realizada a análise do local onde ocorre o processo de usinagem para identificar todos os elementos de entrada necessários. Na segunda etapa são classificados os equipamentos quanto à dimensão, aspecto e indicador, sendo necessário diferenciar equipamentos de consumíveis (por exemplo, energia elétrica e ar comprimido), uma vez que os consumíveis são identificados na primeira etapa. Na terceira etapa são aplicados os instrumentos de medição de acordo com os equipamentos identificados anteriormente. A quarta etapa consiste na construção de uma tabela mostrando os resultados obtidos da análise referente ao tripé da sustentabilidade.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos após a realização dos experimentos descritos na seção anterior. Os resultados são divididos em duas partes: (a) resultados da aplicação das combinações de parâmetros de corte e trajetórias; (b) resultados da aplicação do método de avaliação sustentável do processo de usinagem.

3.1. Avaliação da Usinagem do Aço Ferramenta

3.1.1. Acabamento da superfície usinada e desgaste de ferramenta

Para cada combinação da Tab. (1) foram usinadas quatro cavidades para acompanhar a evolução do acabamento. Na combinação ZZ60 a Fig. (2) apresenta a média das 11 medições de rugosidade na superfície em cada corpo de prova. Para a combinação ZZ60 houve um aumento da rugosidade ao longo da usinagem, que é causado pela condição final do gume, que apresentou lascamento total em um dos inserts e parcial no segundo inserto, conforme mostrado na Fig. (2). Este tipo de desgaste é comum na usinagem de materiais endurecidos.

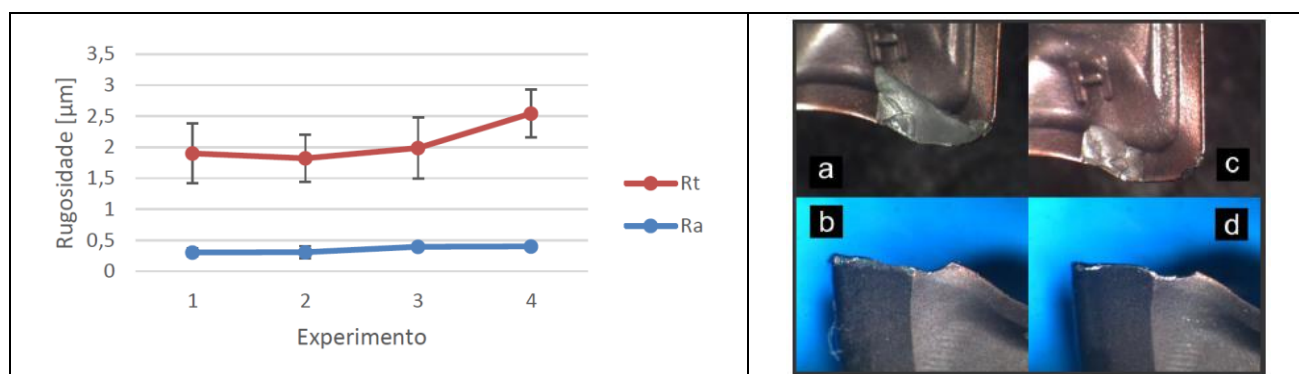


Figura 2. Evolução dos parâmetros de rugosidade R_a e R_t para a combinação ZZ60, e os inserts usados com $V_c=60$ m/min e $f_z=0,07$ mm ao final de quatro experimentos, mostrando o lascamento no gume principal.

Nas combinações PP60, PP85 e ZZ85 o comportamento da média das rugosidades nos parâmetros R_a e R_t é semelhante, em que nos dois primeiros experimentos em cada combinação o valor da rugosidade aumenta com o aumento do tempo de uso do gume. Isto ocorre porque nos dois primeiros experimentos o gume começa a sofrer desgaste e, no momento em que a afiação do gume se estabiliza, há uma melhora no desempenho de corte conduzindo a menores valores de rugosidade. Passado o período em que o gume ultrapassa a condição estável, o desgaste volta a aumentar, consequentemente aumentando os valores de rugosidade do corpo de prova.

O desgaste sofrido pela ferramenta na combinação PP60 foi reduzido, com o desgaste de flanco máximo (VB_{max}) igual a 0,160 mm no inserto 4, e VB_{max} no inserto 3 igual a 0,147 mm. Na combinação PP85 os valores de VB_{max} foram de 0,390mm e 0,374mm para os inserts 5 e 6 respectivamente, como mostra a Fig. (3). A combinação ZZ85 obteve ao final dos experimentos VB_{max} de 0,214mm no inserto 7 e 0,206mm no inserto 8 (Fig. (3)).

Nas duas últimas combinações (TR85 e TR60) foi usada a trajetória trocoidal e, nestes casos, não ocorreu aumento significativo da rugosidade. De acordo com a Fig. (4), a combinação TR85 resultou na redução dos valores de R_t do primeiro até o terceiro experimento, mantendo-se constante no quarto experimento. Por outro lado, o parâmetro R_a manteve-se praticamente constante nos quatro experimentos.

O desgaste de flanco máximo sofrido pela ferramenta da combinação TR85 teve valores de 0,101 mm e 0,117 mm para dois dos inserts, os quais foram os desgastes de menor magnitude se comparados com as demais trajetórias e velocidades de corte relatadas anteriormente.

Os resultados de rugosidade obtidos na combinação TR60 (menor velocidade de corte) foram um pouco superiores aos encontrados na combinação TR85, provavelmente devido à ocorrência de gume postiço (Klocke e Kuchle, 2011).

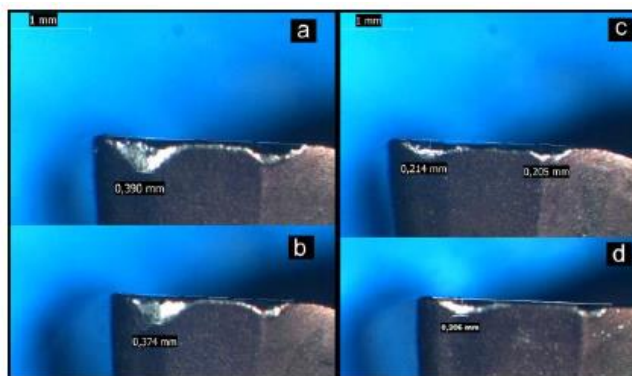


Figura 3. Desgaste VB_{max} dos insertos 5 (a), 6 (b), 7 (c) e 8 (d).

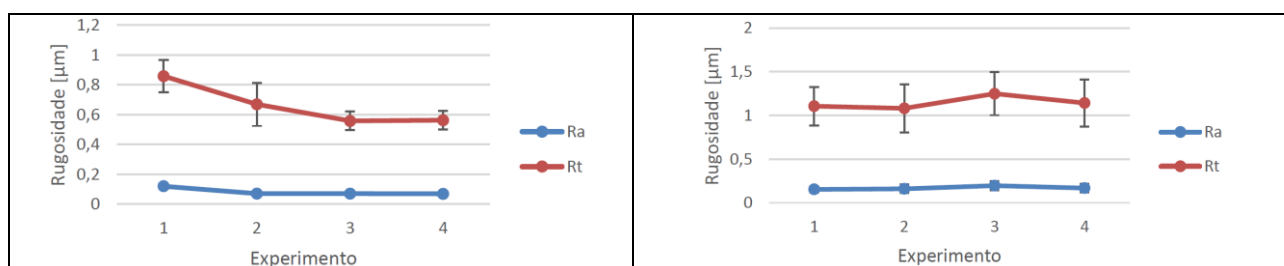


Figura 4. Rugosidades R_a e R_t para as combinações TR85 (esquerda) e TR60 (direita).

O parâmetro R_a na combinação TR60 ficou em média entre 0,150 μm e 0,190 μm (Fig. (4)), enquanto que na combinação TR85 os valores ficaram abaixo dos 0,119 μm nos quatro experimentos. O desgaste resultante do uso de uma menor velocidade de corte (60 m/min) para a trajetória trocoidal (combinação TR60) foi muito próximo ao valor obtido usando-se uma velocidade de corte maior (85 m/min).

Cavaler (2003) buscou identificar a melhor ferramenta para a usinagem do aço AISI D6, realizando uma análise comparativa entre ferramentas de diâmetros diferentes e com cortes diferentes. O autor utilizou o fresamento periférico na usinagem de insertos para matrizes de compactação de pó cerâmico. Cavaler (2003) constatou a ocorrência de lascamento do gume como o encontrado na combinação ZZ60 citada anteriormente. Com relação ao parâmetro de rugosidade R_a , Cavaler (2003) obteve valores entre 0,92 μm e 1,17 μm , muito acima dos valores obtidos no fresamento frontal desenvolvido nesta pesquisa, porém ele trabalhou em regime de desbaste.

O parâmetro de rugosidade R_{sk} (fator de assimetria) medido nas superfícies usinadas foram: R_{sk} mínimo igual a 0,032 μm para a combinação PP85, e R_{sk} máximo igual a 0,699 μm para a combinação ZZ85. Este parâmetro é importante para identificar as superfícies usinadas de acordo com a sua aplicação de engenharia. Em aplicações de fabricação de moldes e matrizes são desejáveis superfícies usinadas por processos convencionais que apresentem um fator de assimetria maior ou igual a zero, uma vez que após a usinagem são aplicados processos de usinagem fina em que as taxas de remoção de material são baixas.

3.1.2. Energia ativa consumida na remoção de material

A energia ativa é a responsável pela realização das movimentações, sendo medida em Wh (watts-hora). No contexto da máquina-ferramenta uma parcela da energia é convertida em energia cinética e outra destinada a componentes eletroeletrônicos para controle de posicionamentos e acionamentos. A Fig. (5) mostra as médias de consumo de energia ativa para as seis combinações. Aumentando-se a velocidade de corte tem-se um maior consumo de energia devido à maior rotação do eixo árvore. Os tempos de ciclo para cada combinação também são mostrados na Fig. (5).

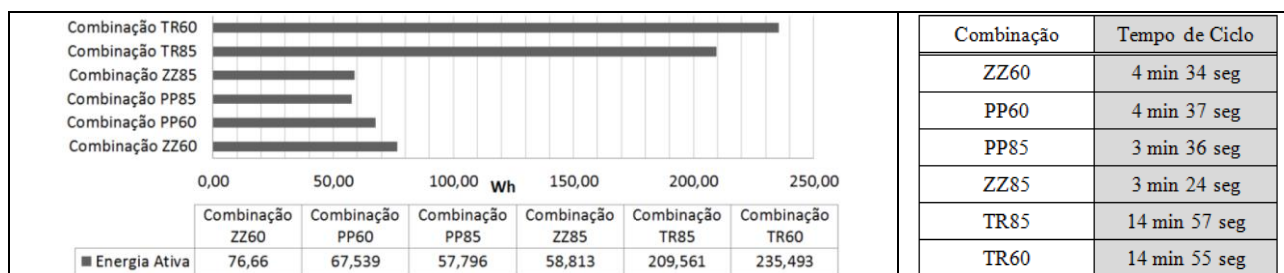


Figura 5. Energia ativa consumida durante a usinagem, e tempos de ciclo para as diferentes trajetórias.

3.2. Avaliação sustentável nas dimensões ambiental, econômica e social

Os procedimentos para avaliação da sustentabilidade foram aplicados no laboratório de usinagem CNC onde foram efetuados os experimentos. As ocorrências no ambiente de ensino não refletem a realidade de um chão de fábrica convencional, porém essa avaliação pode ser aplicada em ambiente de fabricação, desde que se possa identificar e medir as variáveis envolvidas no processo.

3.2.1. Classificação referente às dimensões ambiental, social e econômica

Após a identificação dos insumos presentes no ambiente de usinagem pode-se classificá-los quanto às três dimensões do tripé da sustentabilidade. Outra tarefa realizada consiste em descrever os indicadores relacionados a cada dimensão, visando possibilitar a medição e a padronização da métrica de análise, para comparar os valores obtidos.

Com relação ao aspecto social, o processo de fresamento depende da atuação de um operador. Apesar da possibilidade de se acrescentar alguma inteligência ao sistema de usinagem, é necessária a presença de um operador/programador e, do ponto de vista social, deve-se considerar os riscos aos quais o ser humano está exposto.

Neste trabalho a avaliação da dimensão econômica leva em consideração a utilização dos consumíveis, não contemplando os valores de hora máquina ao exemplo de uma ferramentaria, em que no valor cobrado ao cliente estão previstos o custo de aquisição da máquina ferramenta, custos de manutenção, lucro, dentre outros custos envolvidos na fabricação de matrizes e moldes.

Na Tab. (2) são mostradas as entradas do processo de usinagem, os aspectos relacionados às três dimensões, e os respectivos indicadores.

Tabela 2. Classificação dos elementos do processo nas dimensões ambiental, social e econômica.

Elemento	Dimensão Ambiental	Indicador	Dimensão Social	Indicador	Dimensão Econômica	Indicador
Máquina-ferramenta	Consumo de energia convertido em emissão de CO ₂	tCO ₂ na atmosfera	Exposição à contaminação química	Sim/Não	Consumo de energia convertido em R\$	R\$/hora
	Utilização de fluido lubrificante	Sim/Não	Exposição a ruídos sonoros	decibéis		
	Consumo de óleo lubrificante	litros/minuto	Posição do operador durante a usinagem	Bom/Ruim	Consumo de óleo	R\$/hora
Matéria-prima	Resíduo sólido	kg	Risco de acidente	Sim/Não	Custo da matéria-prima	R\$/kg
			Risco de contaminação	Sim/Não	Custo com tratamento térmico	R\$/kg
Ferramenta de usinagem	Resíduo sólido	kg	Risco de acidente	Sim/Não	Custo do suporte	R\$
					Custo com gume	R\$/hora
Compressor de ar	Consumo de energia elétrica convertido em emissão de CO ₂	tCO ₂ na atmosfera	Exposição a ruídos sonoros	decibéis	Consumo de energia convertido em R\$	R\$/hora
Infraestrutura predial	Consumo de energia elétrica convertido em emissão de CO ₂	kg/cm ³ na atmosfera	Climatização	Sim/Não	Consumo de energia elétrica	R\$/hora
	Resíduo sólido	kg	Luminosidade do ambiente	lux		
			Limpeza e organização	Sim/Não		

3.2.2. Resultados referentes às dimensões ambiental, econômica e social

Cumpridas as etapas de organização e observação do local onde é efetuada a usinagem, realiza-se as operações e a coleta de dados. A quantidade de CO₂ emitido foi obtida mediante o cálculo do consumo da energia elétrica dos equipamentos multiplicado ao fator de emissão disponibilizado pelo Ministério da Ciência e Tecnologia (2016), índice esse que é atualizado mensalmente com base na matriz de geração da energia elétrica brasileira relacionada ao sistema nacional interligado. Nos anos de 2014 e 2015 o Brasil sofreu com um período de seca, resultando em menores volumes de água para a geração de energia nas hidrelétricas, necessitando-se o acionamento de termoeletricas, emitindo-se maior quantidade gases do efeito estufa. Com o intuito de comparar esses valores, o fator de emissão anual médio do ano de 2011 foi de 0,0292 tCO₂/MWh, já o fator anual médio do ano de 2015 foi de 0,1244 tCO₂/MWh.

O total de emissões durante uma hora foi de 0,00018 tCO₂. As participações dos equipamentos e da infraestrutura do valor total foram: infraestrutura predial = 83,85%; máquina CNC = 15,71%; compressor de ar = 0,43%.

Klocke e Kuchle (2011) recomendam que aços endurecidos sejam usinados sem a utilização de fluidos de corte, e deve-se mencionar que todos os experimentos realizados neste trabalho a usinagem foi realizada a seco.

No caso da utilização de óleo pela máquina-ferramenta, a lubrificação é feita de maneira automática, em que a cada seis minutos são injetados 2,5 ml de óleo ISO VG 68, sendo injetado principalmente nos fusos de esfera responsáveis

pelos movimentos da mesa nos eixos x e y , ainda lubrificando as guias do eixo z . Deve-se ressaltar que esse óleo não entra em contato com o restante da máquina, como os compartimentos de fluidos lubrificantes e meios externos.

No âmbito dos aspectos sociais é necessária a avaliação da exposição do operador a risco de acidentes. No ambiente de usinagem CNC os riscos estão ligados às condições e características da máquina utilizada. Nos experimentos realizados, o centro de usinagem conta com uma carenagem protetora e uma porta com fechadura elétrica que evita o funcionamento da mesma com porta aberta.

Durante a preparação do material sobre a mesa e medição das posições relativas para inserção no comando CNC, a máquina opera com velocidade de deslocamento limitada, aumentando a proteção do operador. Mas é necessário sempre considerar o risco de acidente em qualquer processo produtivo envolvendo máquinas, automação e intervenção humana. Assim, optou-se por considerar positivo o risco de acidente, entretanto a probabilidade da ocorrência é baixa.

A análise ergonômica durante uma tarefa consiste na observação sistemática de pessoas trabalhando, focando no trabalho efetivo desempenhado, observando também as condições de contorno impostas pela tarefa a ser desempenhada. A questão de ergonomia é regida pela Norma Regulamentadora 17 (Ministério do Trabalho e Emprego, 2016), a qual infere quanto às posições de trabalho, manuseio de material, conforto térmico e acústico, luminosidade. Para avaliar os resultados foram observadas as recomendações da faixa de 20 a 23°C de temperatura ambiente, conforto sonoro de no máximo 65 dB, e índice de luminosidade de interior de 300 a 500 Lux (ABNT, 1992).

A luminosidade disponível no ambiente e o conforto térmico são bons segundo os requisitos da NR-17, a luminosidade medida durante os testes variou entre 316 a 352 lux e a temperatura do ambiente é controlada pelos dois condicionadores de ar regulados na temperatura de 23°C.

O índice de emissão sonora em média ultrapassou o recomendado de 65 dB durante a usinagem, alcançando pico de 93,9 dB, valor esse obtido na combinação 1, replicação 4. O instrumento de medição que captou a emissão sonora estava localizado a 1600 mm do chão e a uma distância de 500 mm da porta principal da máquina, posição típica do operador durante a tarefa de usinagem. Assim, o impacto negativo para o âmbito social é alto, havendo a necessidade do uso de equipamento de proteção individual (EPI) como protetor auricular ou abafador.

Com relação à preparação da matéria-prima e ferramentas de usinagem no que diz respeito às normas de ergonomia (NR-17), não foram identificados problemas ergonômicos de manuseio dos materiais na usinagem realizada. Porém, em ferramentarias onde moldes e matrizes podem ultrapassar 100 kg de material bruto, o manuseio deve ser feito usando-se equipamentos adequados, como paletes, pontes rolantes ou guinchos.

Do ponto de vista ambiental, a matéria-prima e as ferramentas de corte apresentaram aspectos positivos como, por exemplo, os materiais são recicláveis e reutilizáveis, não necessitando descarte após o uso. O resíduo gerado pela usinagem (cavacos) é recolhido e entregue para uma empresa especializada na reciclagem de metais.

Os resultados da análise na dimensão econômica são mostrados na Fig. (6). Para isso mediu-se a energia consumida por dispositivos durante a fabricação, quantificando o consumo em Watts-hora (Wh) e convertidos para reais (R\$) considerando-se o custo da energia elétrica igual a 0,208880 R\$/kWh, que é o custo apontado pela distribuidora de energia da região central do Rio Grande do Sul (AES Sul, 2016). Não são incluídos os encargos da fornecedora de energia nem tributos. Os custos com ferramentas e materiais foram obtidos mediante contato com os fornecedores.

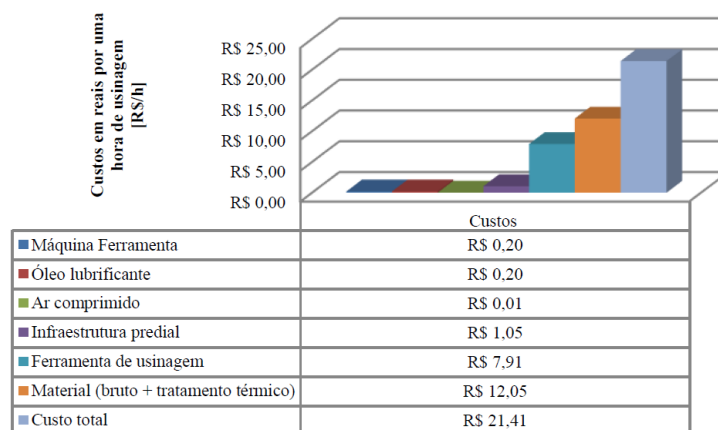


Figura 6. Custos relacionados ao consumo energético dos equipamentos, infraestrutura e materiais utilizados.

A infraestrutura é um custo fixo, que pode ter um maior ou menor impacto dependendo da produtividade. Ao longo do processo de usinagem, todas as lâmpadas fluorescentes permaneceram acesas, e os dois condicionadores de ar ligados. Tem-se a opção de ligar os barramentos de iluminação separadamente, assim o consumo de energia seria reduzido, diminuindo o consumo energético e por sua vez o custo. Por outro lado, considerando-se simultaneamente as três dimensões do tripé da sustentabilidade (ambiental, econômica e social), a redução de luminosidade deve ser feita com o cuidado de proporcionar conforto ao operador com uma iluminação adequada do local. Os valores obtidos relacionados à etapa de classificação das ocorrências no local dos experimentos são apresentados na Tab. (3).

Tabela 3. Valores obtidos pelo método proposto, abrangendo as dimensões ambiental, social e econômica.

Máquina-ferramenta	Consumo de energia convertido em emissão de CO ₂ → 0,00011 tCO ₂ Utilização de fluido lubrificante → Não Consumo de óleo lubrificante → 0,00042 litros/min Exposição do operador à contaminação química → Não Exposição a ruídos sonoros → 93,9 decibéis máx Posição do operador durante a usinagem → Boa Risco de acidente → Sim Consumo de energia convertido em R\$ → 0,20 R\$/hora Consumo de óleo → 0,20 R\$/hora
Matéria-prima	Resíduo sólido → 0,0039 kg/peça Risco de acidente → Sim Risco de contaminação → Não Custo da matéria-prima → 7,28 R\$/kg Custo com tratamento térmico → 8,50 R\$/kg
Ferramenta de usinagem	Resíduo sólido → 0,0085 kg Risco de acidente → Não Custo do suporte → 182,20 R\$ Custo com gume → 7,91 R\$/peça
Compressor de ar	Consumo de energia elétrica convertido em emissão de CO ₂ → 0,00000323 tCO ₂ na atm Exposição a ruídos sonoros → 0 decibéis Consumo de energia convertido em R\$ → 0,01 R\$/peça
Infraestrutura predial	Consumo de energia elétrica convertido em emissão de CO ₂ → 0,00062 tCO ₂ na atm Resíduo sólido → inferior a 3 kg Climatização → Sim Luminosidade do ambiente → 352 lux Limpeza e organização → Sim Consumo de energia elétrica → 3,364 R\$/hora

3.2.3. Mapa de Impactos

A gestão das informações usando-se padrões visuais facilita o acesso de todos aos objetivos da manufatura, contribuindo para eliminar desperdícios e identificar possíveis problemas. Um exemplo de instrumento de gestão visual é o “Andon”, normalmente utilizado em ambientes *lean* (Liker, 2004), que informa a ocorrência de anormalidades mediante aviso luminoso identificando em qual máquina ou estação de trabalho está ocorrendo um problema.

Com o intuito de explicitar as informações dos impactos inerentes ao ambiente de usinagem foi desenvolvido o mapa de impactos mostrado na Fig. (7), o qual contém informações visuais do ambiente onde são realizadas as operações de usinagem, no qual aplica-se o método de avaliação referente a questões sociais, ambientais e econômicas. O mapa de impactos ajuda a visualizar as ocorrências observadas durante a operação de usinagem, podendo-se discutir os resultados coletados in loco e apontar melhorias no ambiente em uma ou mais dimensões de sustentabilidade.

As informações são retratadas pelas circunferências preenchidas com uma, duas ou três cores de acordo com a legenda, simbolizando os impactos nas dimensões consideradas. O mapa também contém informações quantitativas como, por exemplo, os dados de emissão dos equipamentos e os custos produtivos dos elementos retratados no mapa.

Pode-se observar também símbolos relatando os riscos do trabalho realizado pelo operador. Porém, segundo Facchini et al. (1997), não se tem uma normatização quanto a uma simbologia icônica direcionada a expressar tais informações. Assim, Facchini et al. (1997) desenvolveram uma metodologia e elaboraram alguns ícones para representar adequadamente os riscos aos quais os trabalhadores estão submetidos na linha de produção. Para mostrar os riscos presentes no ambiente de realização dos testes de usinagem desta pesquisa foram adotados os ícones propostos por Facchini et al. (1997), conforme mostrado na Fig. (7).

4. CONCLUSÕES

Com a variação das estratégias de usinagem e velocidades de corte, conclui-se que a trajetória trocoidal protege o gume da ferramenta mais do que as outras trajetórias. Entretanto, como esta trajetória tem um tempo de processamento muito maior que as duas outras trajetórias utilizadas, o consumo energético é maior.

Para a trajetória paralela ao contorno, usando-se a velocidade de corte dentro dos limites sugeridos pelo fabricante, resultando em uma rugosidade adequada para o acabamento de molde e matriz, com a ferramenta de corte apresentando um desgaste reduzido e, além disso, o consumo de energia foi inferior ao da trajetória trocoidal. Na trajetória ziguezague os gumes sofreram lascamentos e desgastes no gume principal com as duas velocidades de corte utilizadas e, portanto, não é aconselhado o uso dessa trajetória na operação de acabamento.

Para o processo de fabricação de moldes e matrizes por usinagem dura, recomenda-se o uso da trajetória trocoidal, mesmo consumindo uma maior quantidade de energia. Isto porque a qualidade obtida da superfície é melhor se comparada às demais trajetórias utilizadas neste estudo, o que proporciona ganhos nas etapas posteriores de acabamento fino, que normalmente são realizadas de forma manual e com baixa taxa de remoção, necessitando-se um operador com

elevada perícia na realização da tarefa, que aumenta o impacto nas dimensões ambiental, econômica e social.

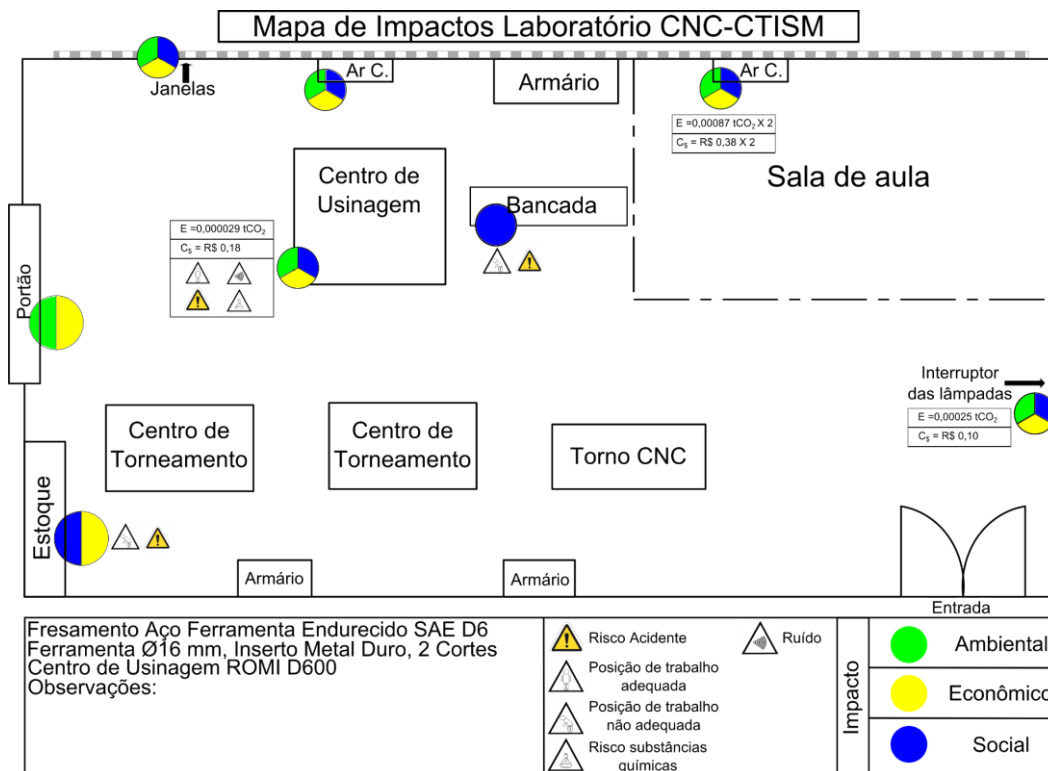


Figura 7. Mapa de impactos referente ao fresamento do aço SAE D6 no laboratório CNC.

Outra contribuição deste trabalho quanto à usinagem de material duro está relacionada com o fresamento do material já no estado endurecido, diferente do que é costumeiro realizar, que consiste na execução de um processo intermediário posterior ao fresamento e anterior ao acabamento fino, que em muitos casos é o processo de retificação.

Com as atuais preocupações em relação ao meio ambiente e com as pessoas envolvidas no processo produtivo, não somente com a contabilização dos custos visando o lucro da organização, tem-se tornado importante avaliações considerando-se as dimensões ambiental, econômica e social, correlacionando-as de forma a aferir o impacto efetivo da fabricação. O método proposto fornece um meio de avaliar os impactos nas três dimensões do tripé da sustentabilidade, apresentando resultados qualitativos e quantitativos para a tomada de decisões para melhorar o processo.

Como sugestões para trabalhos futuros tem-se: (a) realizar o fresamento de aços endurecidos variando-se outros parâmetros de corte, tais como a_p , a_e , f_z . Pode-se também considerar diferentes geometrias dos corpos de prova como, por exemplo, superfícies de forma livre; (b) aplicar outras trajetórias como, por exemplo, espiral; (c) utilizar ferramentas com características como, por exemplo, o revestimento, a geometria do inserto e o diâmetro da fresa.

5. REFERÊNCIAS

- AES Sul, 2016, "Tarifas e Taxas", Acessado em: 20/1/ 2016. Disponível em: https://www.aessul.com.br/grandesclientes/site/content/informacoes/tarifas_e_taxas.aspx.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1992, "NBR 5413 - Iluminância de interiores", Rio de Janeiro.
- Cavaler, L.C.C., 2003, "Fresamento periférico do aço AISI-SAE D6 temperado e revenido utilizando fresas de metal-duro", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.
- Facchini, L.A., Dall'Agnol, M.M., Fassa, A.g. e Lima, R.C., 1997, "Ícones para mapas de riscos: uma proposta construída com os trabalhadores", Cadernos de Saúde Pública. Vol. 13, No. 3, pp.497-502.
- Ferreira, J.C.E. e Wysk, R.A., 2001, "An investigation of the influence of alternative process plans on equipment control", Journal of Manufacturing Systems. Vol. 6, pp. 393-406.
- Grzesik, W., 2008, "Machining of hard materials", in: J.P. Davim, Machining - Fundamentals and Recent Advances. Springer-Verlag, Londres, Reino Unido.
- Kennametal, 2015, "Milling Tooling", Catalog 6050 Metric.
- Klocke, F. e Kuchle, A., 2011, "Manufacturing Processes 1", Springer, Berlin-Heidelberg, Alemanha.
- Liker, J.K., 2004, "The Toyota Way: 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer", McGraw-Hill Education, 1ª edição.

- Menezes, L.J., 2014, “Estudo das condições dimensionais e forças geradas no fresamento de aço endurecido”, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP.
- Ministério da Ciência e Tecnologia, 2016, “Arquivos dos Fatores de Emissão”, Acessado em: 28/1/2016. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/321144.html>.
- Ministério do Trabalho e Emprego, 2016, “NR 17 – Ergonomia”, Acessado em: 5/2/2016. Disponível em: <http://www.mte.gov.br/images/Documentos/SST/NR/NR17.pdf>.
- Mitsubishi, 2015, “Ferramentas de torneamento - ferramentas rotativas - soluções de fixação - C007Z”, Mitsubishi Materials Corporation.
- Montgomery, D.C., 2012, “Design and Analysis of Experiments”, Wiley, 8a edição, Hoboken, NJ, EUA.
- Sandvik, 2013, “Suplemento para os catálogos de Torneamento e Ferramentas Rotativas - CoroPak 14.1”, Sandvik Coromant.
- Savitz, A.W. e Weber, K., 2006, “The Triple Bottom Line”, Jossey-Bass, San Francisco, EUA.
- Smith, G.T., 2008, “Cutting Tool Technology - Industrial Handbook”, Springer-Verlag, Londres, Reino Unido.
- Suchy, I., 2006, “Handbook of Die Design”, McGraw-Hill, 2a Edição.
- Villares Metals, 2009, “Aços para trabalho a frio - VC 131”. [Online] abril 2009. Acessado em: 8 de fevereiro de 2017. Disponível em: <http://www.villaresmetals.com.br/content/download/28447/288001/file/VC131-pt.pdf>.
- Vivancos, J., Luis, C.J., Costa, L. e Ortiz, J.A., 2004, “Optimal machining parameters selection in high speed milling of hardened steels for injection moulds”, Journal of Materials Processing Technology, Vols. 155–156, pp. 1505–1512

6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

ASSESSMENT OF MILLING HARDENED STEEL CONSIDERING ECONOMIC, SOCIAL, AND ENVIRONMENTAL ASPECTS

Gerônimo Freitas do Amaral¹, gamaral91@hotmail.com
João Carlos Espíndola Ferreira¹, j.c.ferreira@ufsc.br

¹Universidade Federal de Santa Catarina, Dep. Engenharia Mecânica, Florianópolis, SC, 88040-900, Brazil

Abstract: In the recent manufacturing perspective there are several concerns of industrial organizations to maintain competitiveness and excellence in its products and services. Currently, with the large consumption of manufactured products, engineers need to progressively develop new portfolios of products to offer to customers. Meanwhile, aspects related to environmental protection have been increasingly appreciated by customers, leading companies that include in their processes elements related to sustainability to have a competitive edge in the market. It is common to use dies and molds in the manufacturing of products, which are produced by machining process and subsequently subjected to heat treatments in order to improve performance. In this context, this research seeks to contribute to the manufacture of machined dies and molds in the hardened state, so as to achieve a good quality surface. Furthermore, this analysis includes the triple bottom line of sustainability by addressing the environmental, economic, and social dimensions. In this work, pockets are milled in AISI D6 tool steel parts (60 HRC hardness) using coated carbide tools. Three different machining trajectories were used: zigzag, parallel to the contour, and trochoidal, as well as different cutting speed values to check the wear of the cutting tool and quality of the machined surface. In addition, the active power required by the machine, the sound emission, and ambient light were monitored. As results of this work, the quality of the machined surface obtained was adequate with respect to the roughness parameters R_a and R_z , and the best roughness result corresponded to the trochoidal trajectory, which also led to less tool wear, but its machining time was three times longer than using the other two trajectories used in the tests. Regarding the assessment of sustainability, an approach was applied in the tests, allowing values of machining parameters that result in improvements in the social and environmental aspects, without losses in the economic field.

Keywords: Milling, Hardened Steels, Triple Bottom Line, Machining Tool Paths, Sustainable Manufacturing.

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.